

多点移動常時微動計測と伝達関数再構築による高層建物の振動特性評価

杉本 浩一 岡田 敬一 白石 理人 森井 雄史
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所)

Dynamic Characteristics Identification of Buildings Based on Multipoint Moving Measurements and Reconstructed Transfer Function

by Koichi Sugimoto, Keiichi Okada, Michihito Shiraishi and Takeshi Mori

Abstract

In this paper, dynamic characteristics of a base-isolated high-rise building located in Tokyo were investigated based on multipoint microtremor measurements. In order to decrease measurement instruments such as vibration sensors and measurement channels, we measured it several times moving a limited number of sensors in each floor at the building. Then, we applied system identification method corresponding to the multipoint moving measurement to identify natural frequencies, damping ratios and mode-shapes up to 3rd mode for each direction of the building.

概要

高層免震建物を対象に多点移動常時微動計測を行い、固有振動数、減衰定数、モード形の推定・分析を行った。対象建物は地上22階、地下3階、高さ106m、RC造の事務所建物である。

建物の常時微動計測は上下階を同時に計測することが一般的だが、今回はセンサ使用数や同時計測するチャンネル数を削減する目的で、建物上部の基準点となる1点を固定し、他センサを1フロア毎に移動させて複数回計測を行った。この手法は、基準点の常時微動波形を毎回計測するため、基準点を入力、各計測点を出力とした伝達関数を各計測波形記録から算出し、周波数領域で除算を行い、カーブフィットすることで、建物全体系としての振動特性を評価することができる。本論では、本手法を用いて3次までの固有振動数と減衰定数、そしてX方向、Y方向、ねじれ方向の振動モード形の同定を試み、多質点系の理論解に近い固有振動モード形状を示すことにより、手法の有効性を確認した。

§1.はじめに

実測に基づく建物の振動特性の同定は、構造設計における資料の蓄積という観点はもちろんのこと、構造物の損傷、劣化の指標として振動特性の変化を監視する構造ヘルスマニタリング実現に向けて不可欠な技術であり、非常に重要である。これまで多くの実測事例が報告されている¹⁾が、高層建物全層に対して高密度に実測し同定を行った例はさほど多くない。そこで本研究では、東京都中央区に立地する高層免震建物に対して非常に高密度な常時微動計測を行い、高次振動やねじれを含む固有振動モード形状の把握を試みた。

通常、建物の常時微動計測を行う場合、計測器を建物全体にバランスよく設置し多点同時計測を行うのが基本的な計測手法である。しかし本計測では、高密度に計測でき、かつ使用するサーボ型速度計(以後、センサ)の使用台数を極力減らすことを目的に、少数のセンサを各階に移動させながら複数回常時微動計測を行う手法²⁾を選定した。その際、計測の基準点を振動が励

起されやすい測定点の1つとして考えられるオフィス最上階(21階)北側とし、全ての計測に対して常時微動速度波形の記録を行った。

本論で同定する建物の振動特性とは、系全体の固有振動数や減衰定数、また固有振動モード形状のことである。これらの一般的な推定手法には、建物の最下階と最上階で得られた微動記録を用いて伝達関数を算出し、系全体の固有振動数と減衰定数の推定を行い、推定した固有振動数において、最下階とその他の計測点の微動記録を用いて算出した各々の伝達関数から振幅情報と位相情報を抽出し、固有振動モード形状を推定するという手法がある。しかし本計測では、計測基準点をオフィス最上階に設置したことにより、一般的な分析手法として先に示した、最下階と各計測点との伝達関数を直接算出することができない。そこで本論では、21階北側に設置した計測基準点の微動記録を入力とし、最下階で計測した微動記録を出力とした伝達関数を用いて、最下階を入力、上部の各計測点を出力とした伝達関数を再構築して振動特性の分析を行った。

この伝達関数を再構築する手法についても詳細に報告する。さらに再構築した伝達関数に理論式をカーブフィッティングすることにより、系全体の固有振動数・減衰定数と各階の刺激関数を求め、離散的な伝達関数を直接用いる場合と比較し、多質点系モデルの理論解に近い固有振動モード形状の同定を行うことができることを示した。

§2.計測概要

2.1 建物概要

東京都中央区京橋に2012年に竣工した高層免震建物を対象として常時微動計測を行った。写真-1に対象建物の外観写真を示し、建物概要を表-1に示す。本建物は免震構造を採用しており、免震階(BIS)は地下1階床下に位置している。建物高さは106.0m、構造形式はRC造(一部鉄骨造)で地上22階(オフィスは21階まで)、地下3階建ての事務所建物である。基本平面形状は長辺方向63.0m、短辺方向34.2m、偏心コア型を採用しており全層がほぼ同一平面形状の整形な建物である。基準階の執務スペースは柱のない大空間となっていることが特徴である。

2.2 常時微動計測

常時微動計測は2012年5月28日の夕方から29日の昼にかけて行った。計測を行った当時、対象建物は竣工直後であり、建物内には計測担当者、及び少数の工事作業員しか居らず、一部のフロアに仕器が設置されているのみであった。また当日は、雨が降る事も強風が吹く事もなく、微動記録に影響を与える天候ではなかった。計測にはセンサ(東京測振製 VSE-15D)を使用し、3台を1組としてそれぞれx、y、z方向を計測できるように設置し、合計5組(全15台)を用いて対象建物の地下2階、地下3階以外の全階に対して計測を行った。計測に使用したケーブルは、各組3台のセンサに対し1本を3つに分岐して使用したため、基本的には合計5本のケーブルしか使用しておらず、建物全体にセンサを配置する通常の計測手法に比べ、配線の手間が掛からない点も本手法のメリットと言える。

計測する際、振動が励起されやすい測定点の1つと考えられる21階北側を計測基準点としてセンサを常に1組設置した。その他4組のセンサを22階から免震階(BIS)まで各階に移動させ、その都度計測を実施した。各階の計測時間は1回15分とし、サンプリング振動数を100Hzとして常時微動速度波形を記録した。合計25回のセンサ移動を行い、建物全体を高密度に計測することで建物の固有振動モード性状を詳細に同定することができる。図-1の(a)~(d)に各階計測点位置の平面図

を示し、図-2に各階計測点位置の立面図を示す。図-1の(c)に示すように、計測点は基本的に1フロアに対して長辺方向に4点設置しているが、図-1の(b)、(d)より21階と地下階については短辺方向にも2点センサを追加設置し計6点について計測を行った。写真-2に免震階に設置したセンサの設置状況を示す。さらに表-2には25回行った各計測ケースについて基準点以外のセンサの位置一覧を示す。表中の計測位置の番号は図-1に示す番号に対応している。



写真-1 対象建物外観

表-1 建物概要

竣工年	2012年
建築面積	2728m ²
延床面積	51365m ²
階数	地下3階、地上22階、塔屋1階
免震階	地下1階床下
基準階階高	4200mm
構造	免震構造 鉄筋コンクリート造(一部鉄骨造)
基礎	直接基礎



写真-2 センサ設置状況

§3.対象建物の振動特性分析

3.1 固有振動数と減衰定数の同定

本研究で行った常時微動計測では、計測に使用するセンサの数を極力少なくし、各階にセンサを移動させつつ複数回計測を行うことで、同時計測するチャンネル数を大幅に減らすこと、さらに計測に使用するケーブルを少なくできる利点がある。対象建物の振動特性のうち、X(長辺)方向、Y(短辺)方向、およびねじれ方向の、それぞれ3次までの固有振動数、減衰定数を推定し、さらに3次までの固有振動モード形状の同定を行った。

まず、X方向、Y方向、ねじれ方向の固有振動数、減衰定数の推定手法について概説する。X方向の固有振動数と減衰定数は、入力を受震階の計測点5と6、出力を21階の計測点5と6でそれぞれ記録した微動波形を時刻歴領域で平均化したデータから求めた伝達関数を用いて推定した。ただし本計測では受震階の計測点5、6と21階の計測点5、6は同時に計測を行っていないため、1度の計測データで上記の伝達関数を直接算出することができない。そこで以下に示す手法により伝達関数を再構築し、固有振動数と減衰定数の同定を試みた。

- ① 21階基準点における微動波形を入力とし、受震階の計測点5、6の微動波形を時刻歴領域で平均化したデータを出力として、FFTにより周波数領域に変換し伝達関数を算出する。(計測ケースNo.1)
- ② 21階基準点における微動波形を入力とし、21階の

計測点5、6の微動波形を時刻歴領域で平均化したデータを出力としてFFTにより周波数領域に変換し伝達関数を算出する。(計測ケースNo.25)

- ③ 周波数領域において、②の伝達関数/①の伝達関数を求める。
- ④ 再構築した伝達関数に、理論式を非線形最小2乗法を用いてカーブフィッティングすることにより固有振動数と減衰定数を推定する。その際用いた理論式³⁾を式(1)に示す。

$$H(f) = 1 + \sum_{j=1}^n \frac{\beta u_j f^2}{-f^2 + 2ih_j f_j f + f_j^2} \quad (1)$$

ここで、 $H(f)$ は伝達関数、 f は振動数、 f_j 、 h_j 、 βu_j はそれぞれj次の固有振動数、減衰定数、刺激関数、 n は対象とするモード次数のことであり本解析では3次である。①、②でそれぞれ算出したX方向の伝達関数の振幅成分と位相成分を図-3と図-4に示す。また、③

表-2 位相ケースと移動計測位置一覧

計測ケース No.	計測階	移動計測点					
		計測位置*1(方向は全てX,Y,Zの3方向)					
		1	2	3	4	5	6
No.1	免震階 B1F					○	○
No.2~No.24	免震階~21F	○	○	○	○		
No.25	21F 22F					○	○

※1 計測位置の番号は図1の番号に対応している。

※2 全ての計測ケースにおいて21Fの北側を基準点として計測している。

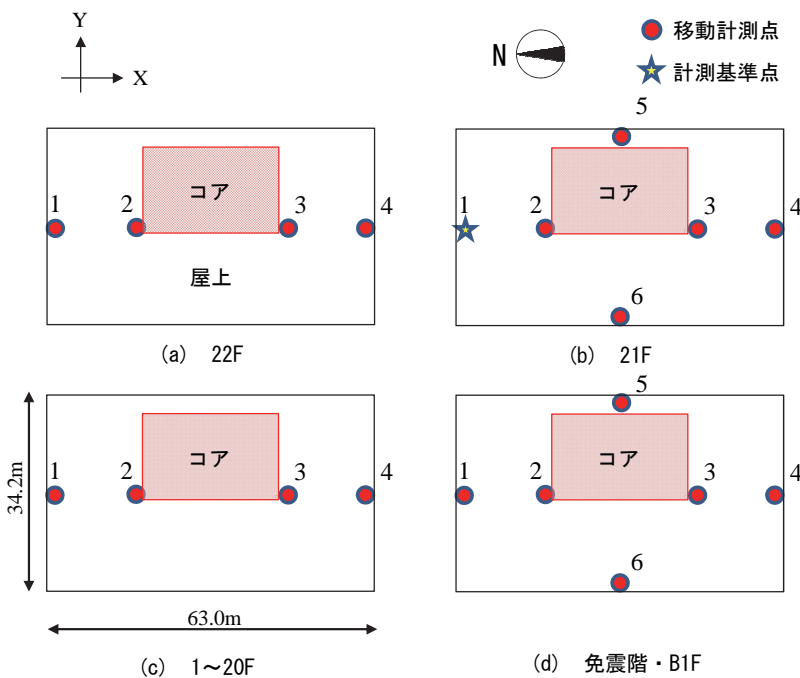


図-1 計測位置平面図

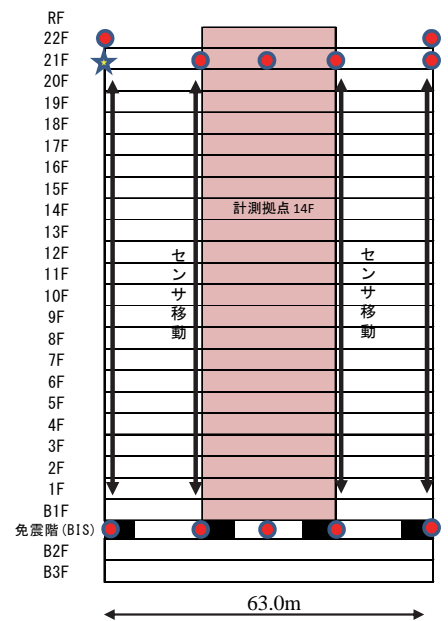


図-2 計測位置立面図

で再構築し④でカーブフィッティングしたX方向の伝達関数の振幅成分と位相成分を図-5に示す。図-3は入力とした計測階が21階であり、出力とした計測階が免震階であるため、固有振動数付近では伝達関数の振幅は1より小さくなっている。図-4においては、入力と出力をそれぞれ21階で計測した微動記録を使用しているため、伝達関数の振幅はほぼ1となっている。これらの伝達関数を周波数領域で除算することにより、図-5に示す下階を入力、上階を出力とした伝達関数を求めることができる。図-5において3次の固有振動数付近で若干のばらつきはあるものの、多質点系の理論解と同様な伝達関数形状となっており、今回用いる伝達関数の再構築手法が有効であることが分かる。

Y方向とねじれ方向における固有振動数と減衰定数の推定も基本的に同様の手法を用いて行った。まずY方向については、上記の①において入力を21階基準点の微動記録、出力を免震階の計測点1~4の微動記録を時刻歴領域で平均化したデータとして伝達関数を算出し(計測ケース No.1)、②において入力を21階基準点の微動記録、出力を12階の計測点1~4の微動記録を時刻歴領域で平均化したデータとして伝達関数を算出し(計測ケース No.15)、③において①、②の伝達関数を周波数領域で除算を行うことで、入力が免震階、出力が12階となる伝達関数を再構築した。ここで、③の伝達関数の出力に対応する計測階をX方向の振動特性を同定する時に使用した21階ではなく12階とした理由は、後の3.2節で振動モード形状の同定結果を示すように、Y方向に21階が節となる振動モードがあり、①と②で伝達関数を算出する際の分母が非常に小さい数値となることに伴う同定精度の低下をさけるためである。そこで全ての振動モードで、ある程度大きな振幅が得られている12階を出力階とした。そして、X方向同様に③で算出した伝達関数に式(1)の理論式をカーブフィッティングすることで固有振動数と減衰定数を推定した。①、②、④で算出した伝達関数の振幅成分と位相成分を図-6~図-8に示す。図-6において、振幅が下に凸となる振動数のポイントが、図-5のX方向と比較すると多くあり、並進とねじれの成分の両方を含むことが推察される。これは基準点が建物の北側先端であり、両成分とも含んでいることが起因していると思われる。

しかし図-7では、並進成分を励起させた12階のデータを使用することにより、21階のねじれ成分のみを抽出し、図-6と図-7を用いて得られる図-8においては、X方向と同様に並進成分のみを抽出することができ、固有振動数と減衰定数が精度よく同定できていることがわかる。

ねじれ方向についてもY方向の同定と同じ計測点の微動波形を使用し同定を行った。ただし、Y方向の同定方法とは以下に示す2点が異なっている。1点目は①と②の伝達関数を算出する際に、ねじれ挙動を励起させるために計測点1と2の微動波形記録の和に、3と4の微動波形記録を時刻歴領域で-1倍した波形を足し合わせ、平均化した波形を入力とした点である。2点目は④でカーブフィッティングを行う際に使用する理論式を、式(1)から下記の式(2)に変更した点である。式(2)は式(1)から直達項を除いた式となっている。

$$H(f) = \sum_{j=1}^n \frac{\beta u_j f^2}{-f^2 + 2ih_j f_j f + f_j^2} \quad (2)$$

①、②、④でそれぞれ算出した伝達関数の振幅成分と位相成分を図-9~図-11に示す。図-9は、図-6で振幅が下に凸となるいくつかの振動数で下に凸となる伝達関数を描くことができている。Y方向の並進成分の同定時と同じデータを用いたが、免震階と12階の計測点1~4のデータ平均化手法を変え、ねじれ成分を励起させたデータを使用することにより、図-10では図-8で示したY方向の伝達関数振幅のピークと同じ振動数で振幅が下に凸となっている。その結果、図-9と図-10より求めた図-11の伝達関数では、ねじれ成分のみを抽出でき精度良くフィッティングすることが出来ている。

表-3 各方向の固有振動数と減衰定数

モード形状	1次	2次	3次	
固有振動数 (Hz)	Y並進	0.633	2.558	4.338
	X並進	0.907	3.557	5.953
	ねじれ	1.184	3.326	5.520
減衰定数 (%)	Y並進	0.4	1.0	1.3
	X並進	1.1	2.1	2.9
	ねじれ	0.9	0.8	0.3

表-4 ①と②の伝達関数作成に使用したデータ一覧

方向	①の伝達関数作成に使用するデータ		②の伝達関数作成に使用するデータ		カーブフィット理論式
	入力データ	出力データ	入力データ	出力データ	
X	21階基準点【1】	[免震階【5】+【6】]/2	21階基準点【1】	[21階【5】+【6】]/2	式(1)
Y	21階基準点【1】	[免震階【1】+【2】+【3】+【4】]/4	21階基準点【1】	[12階【1】+【2】+【3】+【4】]/4	式(1)
ねじれ	21階基準点【1】	[免震階【1】+【2】-【3】-【4】]/4	21階基準点【1】	[12階【1】+【2】-【3】-【4】]/4	式(2)

注) 【 】内の数字は図1で示す計測位置番号に対応している。

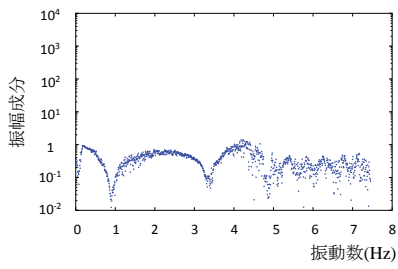


図-3 ①のX方向伝達関数(免震階/21階基準)

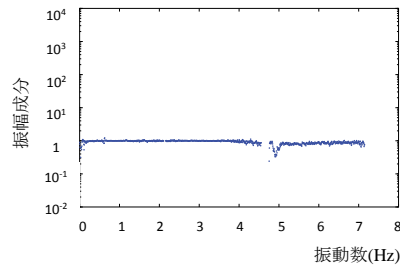


図-4 ②のX方向伝達関数(21階/21階基準)

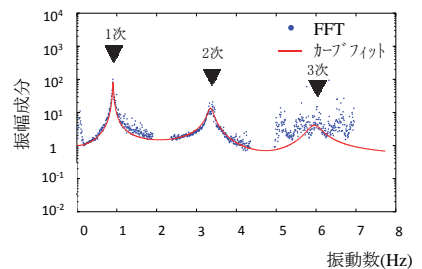


図-5 ④のX方向伝達関数(21階/免震階)

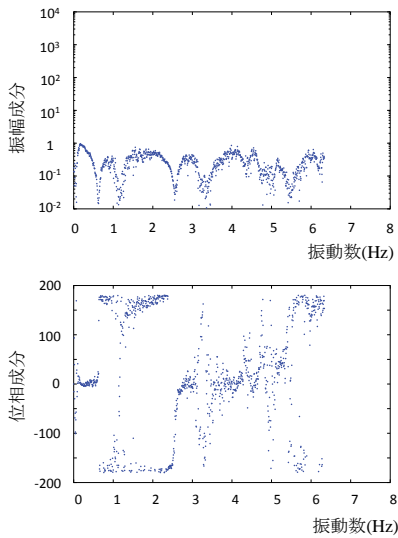


図-6 ①のY方向伝達関数(免震階/21階基準)

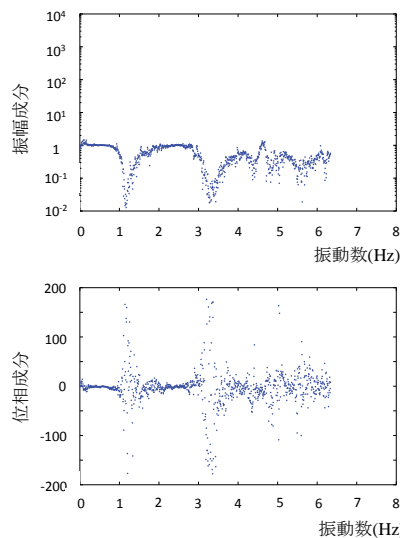


図-7 ②のY方向伝達関数(12階/21階基準)

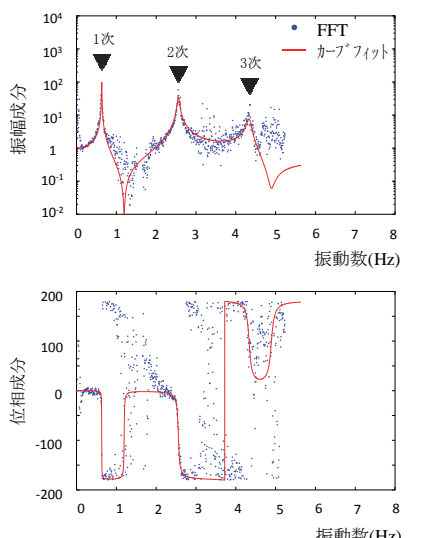


図-8 ④のY方向伝達関数(12階/免震階)

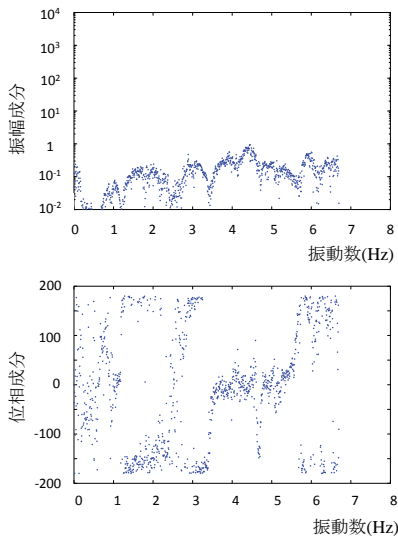


図-9 ①のねじれ方向伝達関数(免震階/21階基準)

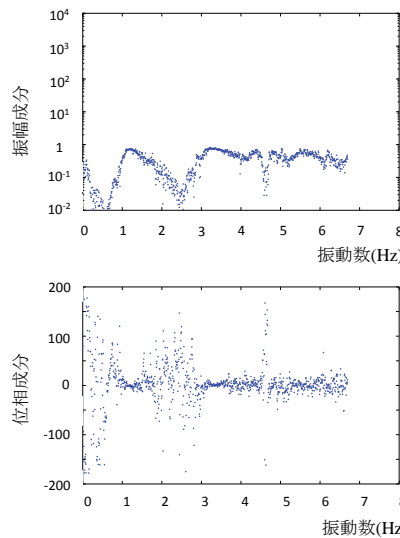


図-10 ②のねじれ方向伝達関数(12階/21階基準)

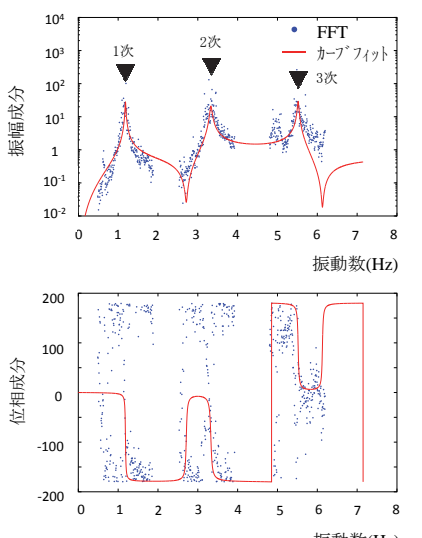


図-11 ④のねじれ方向伝達関数(12階/免震階)

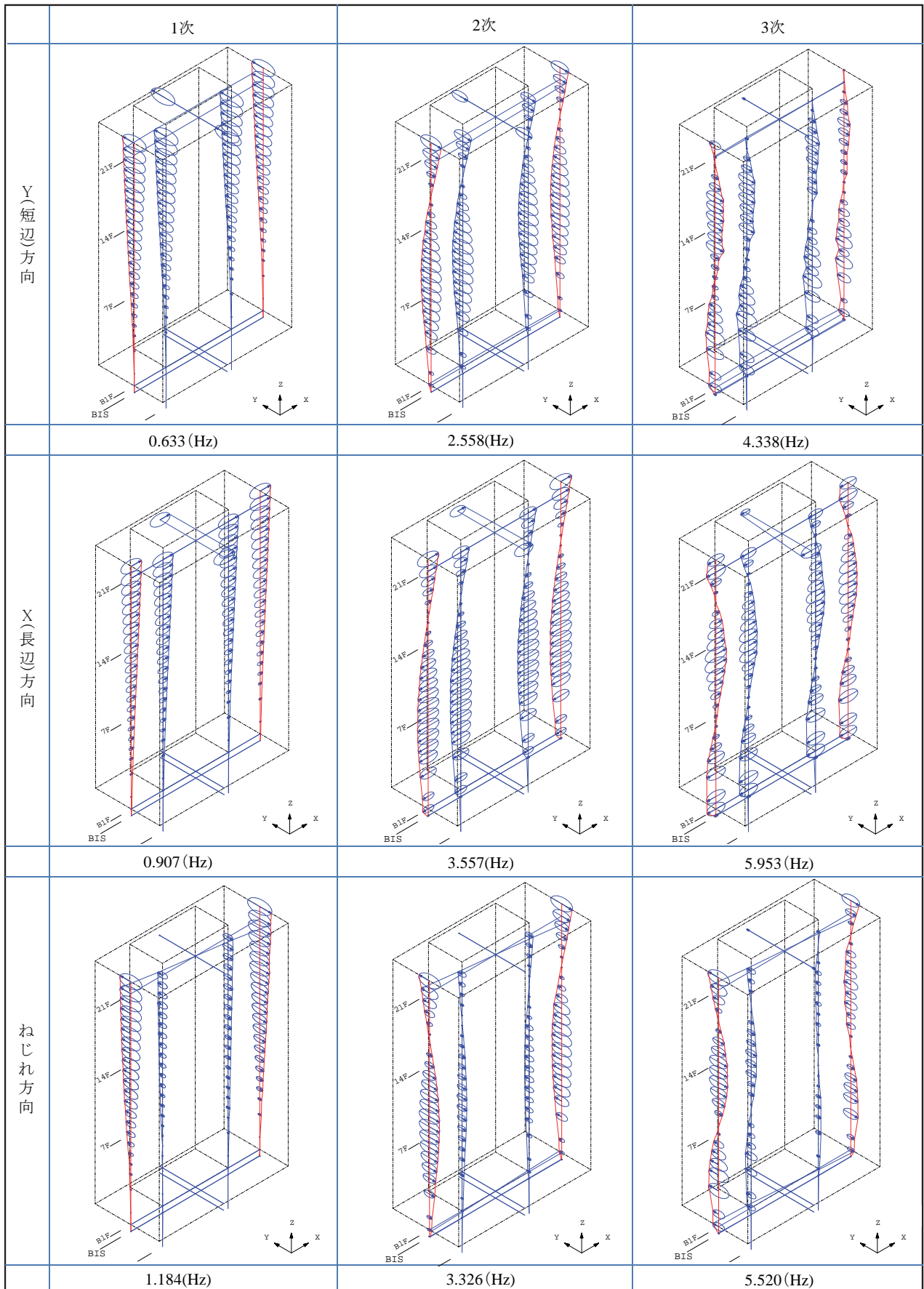


図-12 各方向の固有振動モード形状の一覧

以上の手法を用いてX方向、Y方向、ねじれ方向の3方向において推定した固有振動数と減衰定数の一覧を表-3に示す。また表-4に、本節で同定に用いた①と②の伝達関数を算出するために使用した入出力データの一覧を方向毎に示している。特に出力データについては各計測点で記録したデータを時間領域で平均化しているため、その算定式を記している。使用するセンサ数を極力減らし、各階にセンサを移動させながら複数回計測する手法であっても、各方向の3次までの固有振動数を十分精度よく推定できた。

3.2 固有振動モード形状の同定

本節では各方向の固有振動モード形の算出方法を概説する。建物の固有振動モード形状を同定するためには、3.1節において③で再構築した伝達関数が全計測点において必要となる。すなわち入力を受震階とし、出力が各計測点となる伝達関数を全て求める必要がある。そこで②の段階で出力となる計測点を全計測点(100地点)とし、③の段階で100個の伝達関数をX、Y、ねじれの3方向それぞれで算出した。また④で全ての伝達関数に対してカーブフィッティングを行うが、その際の固有振動数と減衰定数には3.1節で推定した数値を固定値として非線形最小二乗法を適用した。そして3.1節で推定した固有振動数において、フィッティングされた各伝達関数の理論式における振幅と位相を取り出し、各方向の固有振動モード形状を描画した。このようにカーブフィッティングすることにより、離散的な伝達関数を直接用いるのと異なり任意の振動数において精度の高いモード形状を推定できる。図-12

に各方向の固有振動モード形状の一覧を示す。図-12より、1~3次まで位相を含めて滑らかな振動モードを描いていることがわかり、本手法の同定精度が非常に高いことが確認できる。またY方向の3次モードにおいて21階が節になっていることが確認できるが、3.1節において再構築する伝達関数の出力を21階ではなく12階の微動記録としたのはこのためである。

さらにカーブフィッティングの有効性を示すために、カーブフィットせずに算出したY方向の3次までの固有振動モードを図-13に示し図-12と比較する。図-13は入力を21階の計測基準点とし、出力を各計測点とした伝達関数を各計測データから直接的に求め、それら伝達関数をカーブフィッティングせずに3.1節で同定した固有振動数においてそのまま切り出し描画した振動モードである。図-13を見ると1次と2次に関しては、図-12と比較してもほぼ同等の精度で同定できているが、3次に関しては図-13の場合、明らかに形状が乱れており、図-12と比較して推定精度が悪いことがわかる。これは、カーブフィッティングせずにばらつきを有する離散的な伝達関数をそのまま抽出していることが原因であると考えられる。

§4.まとめ

高層免震建物を対象に多点移動常時微動計測を行い、固有振動数、減衰定数、モード形の推定・分析を行った。

一般的に行われる下階と上階を同時に多点計測する手法ではなく、建物全体を高密度に計測し、かつセン

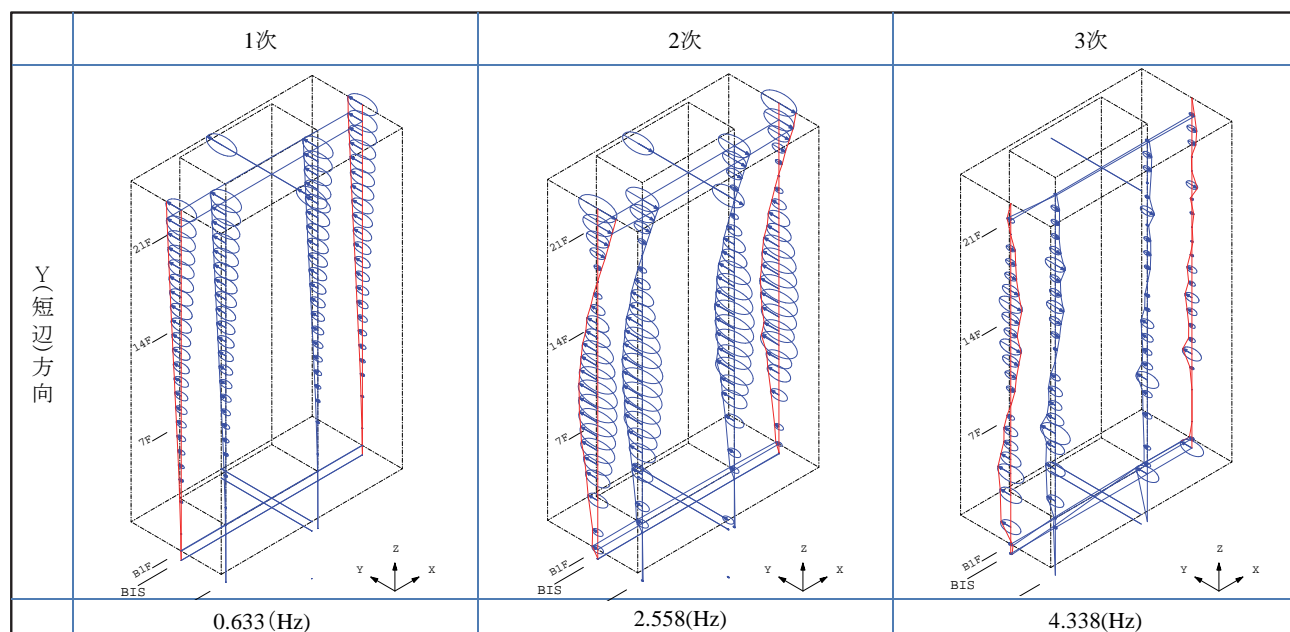


図-13 カーブフィッティングを適用しない場合のY方向の固有振動モード形状の一覧

サ使用数や同時計測するチャンネル数を削減する目的で、ある基準点となる1点を固定点として、1フロア毎にセンサを移動させながら複数回常時微動計測を行った。本計測手法においては、各階の微動波形記録を同時に計測する必要はなく、基準点の微動波形記録が各計測において必ず記録されているため、基準点における微動記録を入力として同定に必要な計測点における伝達関数を算出し、周波数領域で除算を行って再構築した伝達関数に対してカーブフィッティングすることで固有振動数と減衰定数を精度よく推定することが

できた。また、全計測点において再構築した伝達関数に対して同様にカーブフィッティングを行い、各層の刺激関数を同定することにより、3次までのX方向、Y方向、ねじれ方向の固有振動モード形状を精度よく推定することができ、本手法の有効性を確認できた。なお、対象建物には構造モニタリングシステムが設置されており、竣工後も微動および地震観測を継続していく予定であり、供用中の振動特性を外部要因(温度、振幅等)の影響⁴⁾も含めて分析する予定である。

<参考文献>

- 1)石橋敏久, 内藤幸雄: 常時微動による高層建造物の振動特性推定に及ぼす風の影響の検討, 丹保院建築学会構造系論文集, 第464号, pp71-80, 1994.10
- 2)岡田敬一, 白石理人 他: 施工期間中の鉄骨高層建物の振動特性評価, その1, その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集B-2, pp.567~570, 2008
- 3)斎藤知生: モード解析型多入力多出力ARXモデルを用いた高層建物のシステム同定, 日本建築学会構造系論文集, 第508号, pp47-54, 1998.6
- 4) Saito, T. and Shiraishi, M.: Probabilistic estimation of fluctuations in the dynamic characteristics of a seismically isolated building, *Proceedings of the 10th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering*.

